

UDK 624.072.2:624.023

Primljeno 14. 5. 2007,

# Ispitivanja utjecaja spona na nosivost betonskih greda pri tlačnom slomu

Jure Radnić, Alen Harapin, Radoslav Markić

## Ključne riječi

betonska greda,  
spona, uzorak,  
čisto savijanje,  
tlačni slom,  
nosivost,  
deformabilnost

## Key words

concrete beam,  
tie, sample,  
pure bending,  
compressive failure,  
bearing capacity,  
deformability

## Mots clés

poutre en béton,  
attache,  
échantillon,  
flexion pure,  
rupture de compression,  
capacité portante,  
déformabilité

## Ключевые слова

бетонная балка,  
скоба,  
образец,  
чистый изгиб,  
лом под давлением,  
несущая способность,  
деформобильность

## Schlüsselworte

Betonbalken,  
Bügel, Prüfkörper,  
reine Biegung,  
Druckbruch,  
Tragfähigkeit,  
Verformbarkeit

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Prethodno priopćenje

## Ispitivanja utjecaja spona na nosivost betonskih greda pri tlačnom slomu

Prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja utjecaja spona na nosivost i deformabilnost betonskih greda opterećenih na savijanje s tlačnim slomom betona. Istražen je utjecaj čvrstoće betona te oblika i razmaka spona na graničnu nosivost i deformabilnost greda. Opisan je način ispitivanja, pri čemu su za svako stanje ispitivana po tri identična uzorka, a prikazani rezultati su srednja vrijednost izmjerenih veličina. U zaključku su navedene i preporuke za praksu.

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Preliminary note

## Testing influence of ties on the bearing capacity of concrete beams at compressive failure

Results obtained during experimental testing of tie influence on bearing capacity and deformability of concrete beams subjected to pure bending, with compressive failure of concrete, are presented. The way in which the concrete strength and the form and spacing of ties exert influence on the limit capacity and deformability of beams is studied. The testing method, involving three identical samples for every state, is described, and the results are presented as average values of measured parameters. Practical recommendations are given in the final part of the paper.

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Note préliminaire

## L'analyse de l'influence des attaches sur la capacité portante des poutres en béton à la rupture de compression

Les résultats obtenus au cours de l'analyse expérimentale de l'influence des attaches sur la capacité portante et la déformabilité des poutres en béton assujetties à la flexion pure, avec la rupture de compression du béton, sont présentés. La manière dans laquelle la résistance de béton et la forme et l'écart des attaches influencent la capacité limite et la déformabilité des poutres est étudiée. La méthode d'essai, base sur l'essai de trois échantillons identiques pour chaque état, est décrite, et les résultats sont présentés comme valeurs moyennes des paramètres mesurés. Les recommandations pratiques sont données dans la partie finale de l'ouvrage.

Й. Раднич, Р. Маркич, А. Харарин

Предварительное сообщение

## Испытания влияния скоб на несущую способность балок при ломе под давлением

В работе показаны результаты экспериментальных испытаний влияния скоб на несущую способность и деформобильность бетонных балок, нагружённых на чистый изгиб с ломом бетона под давлением. Исследовано влияние прочности бетона, а также формы и расстояния между скобами на предельную несущую способность и деформобильность балок. Описан способ испытания, при чём для каждого состояния испытывалось по три идентичных образца, а показанные результаты являются средним значением измеренных величин. В заключении наведены рекомендации для употребления.

J. Radnić, A. Harapin, R. Markić

Vorherige Mitteilung

## Untersuchung des Einflusses der Bügel auf die Tragfähigkeit von Betonbalken bei Druckbruch

Dargestellt sind Ergebnisse experimentaler Untersuchungen des Einflusses der Bügel auf die Tragfähigkeit und Verformbarkeit von Betonbalken belastet mit reiner Biegung mit Druckbruch des Betons. Untersucht ist der Einfluss von Betonfestigkeit und Bügelform und - Abstand auf die Grenztragfähigkeit und - Verformbarkeit der Balken. Die Untersuchungsweise ist beschrieben, wobei für jeden Zustand drei identische Prüfkörper untersucht wurden. Die dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte der gemessene Größen. Im Schluss sind Empfehlungen für die Praxis angeführt.

Autori: Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Alen Harapin**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Građevinsko–Arhitektonski fakultet; **Radoslav Markić** dipl. ing. građ.; Mucić & Co d.o.o., L. Mandića 18, Dugopolje

## 1 Uvod

Tlačni beton ovijen sponama ima veću uzdužnu graničnu nosivost i deformabilnost od betona sa slobodnim bočnim deformiranjem. Naime, spone smanjuju bočnu deformaciju betona izazivajući u njemu bočni tlak. To vodi većoj uzdužnoj graničnoj nosivosti i deformabilnosti tlačno opterećenih betonskih elemenata. Taj je efekt osobito izražen kod centrično tlačno opterećenih stupova, gdje se gustim poprečnim sponama može znatno povećati njihova granična tlačna nosivost i duktilnost.

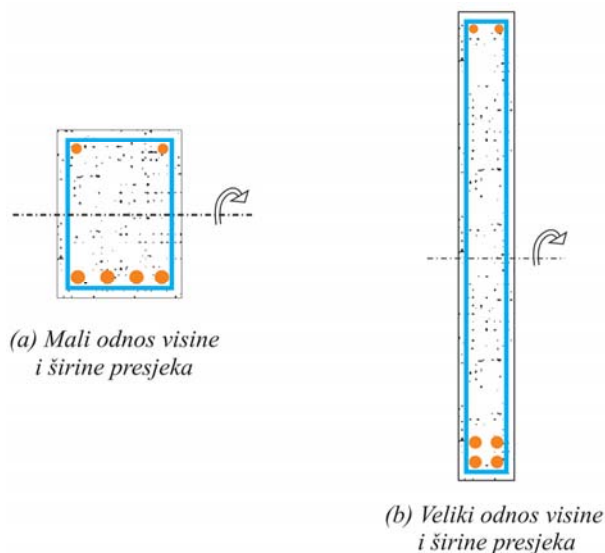
Provedena su mnogobrojna ispitivanja kratkih centrično naprežanih stupova kod kojih je istraživao utjecaj spona na njihovu nosivost i duktilnost. Ispitivani su stupovi različitog oblika poprečnog presjeka, s uzdužnom armaturom i bez nje, s različitim količinama i razmakom poprečne armature, s različito oblikovanim sponama i spiralnom armaturom, s različitim čvrstoćama betona, s različitim vrstama i veličinama agregata i sl. Rezultati nekih takvih ispitivanja mogu se, primjerice, naći u [1] do [14].

S povećanjem ekscentričnosti uzdužne tlačne sile, povoljan utjecaj spona na graničnu tlačnu nosivost betonskog elementa sve se više smanjuje. Očito je da je on najmanji u slučaju savijanja bez uzdužne sile. Postavlja se pitanje veličine utjecaja spona na graničnu nosivost takvih betonskih greda kod kojih slom nastaje drobljenjem betona u tlačnom pojasu.

Autori ovog rada u dostupnoj literaturi nisu pronašli nikakva eksperimentalna istraživanja utjecaja spona na graničnu nosivost greda kod kojih slom nastaje drobljenjem tlačnog betona pri savijanju bez uzdužne sile. Prema spoznajama ponašanja centrično tlačno opterećenih stupova [1] do [13], realno je očekivati da će spone pridonijeti povećanju nosivosti i duktilnosti i betonskih greda opterećenih na savijanje bez uzdužne sile. Analogno s ponašanjem centrično naprežanih stupova, može se očekivati da će utjecaj spona biti povoljniji što je količina poprečne armature veća. Pri tome bi povećanju tlačne nosivosti betona trebalo ponajviše pridonositi smanjenje razmaka spona, a manjim dijelom povećanje njihova promjera.

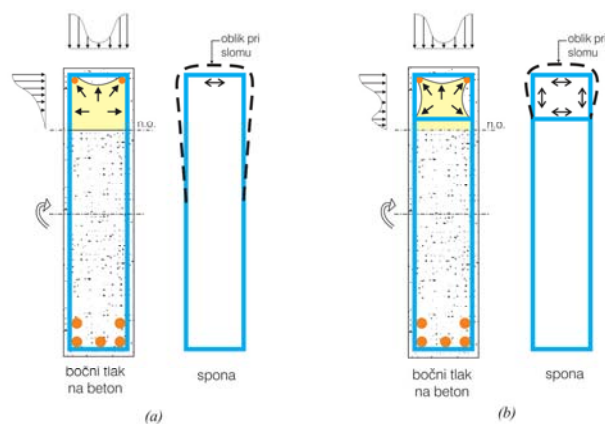
Očekuje se da oblik poprečnog presjeka greda također ima utjecaj na njihovu graničnu tlačnu nosivost (slika 1.). S obzirom na to da spone izazivaju bočni tlak na beton i prostorno stanje naprezanja u presjeku, može se očekivati različita granična nosivost i deformabilnost greda s malim odnosom visine i širine presjeka (slika 1.a) u odnosu na grede s velikim odnosom visine i širine presjeka (slika 1.b) pri istom postotku armiranja sponama. Posebno se očekuje znatan utjecaj oblika spona, što može biti izraženo osobito kod visokih greda (slika 2.). Klasične dvorezne spone prema slici 2.a vjerojatno će pružiti ma-

li otpor bočnim deformacijama betona, što će vjerojatno rezultirati i malim povećanjem granične tlačne čvrstoće betona. Spone prema slici 2.b vjerojatno će osigurati veći bočni tlak na beton, a time i veću graničnu nosivost i deformabilnost grede. Utjecaj na granično stanje nosivosti grede još će vjerojatno imati količina, raspored i promjer uzdužne tlačne armature, vrsta betona (najveće zrno agregata) i drugi parametri.



Slika 1. Oblici poprečnog presjeka grede

U ovom su radu prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja betonskih greda opterećenih na savijanje, bez uzdužne sile kod kojih slom nastaje drobljenjem betona u tlačnom pojasu. Istražen je utjecaj čvrstoće betona te oblika i razmaka spona na graničnu nosivost i deformabilnost razmatranih greda. Pritom su za svako pojedinačno stanje izrađena i ispitana po tri istovjetna uzorka, a prikazani su rezultati srednja vrijednost izmjerenih veličina. Opis provedenih eksperimenata, prikaz dobivenih rezultata i zaključci provedenih istraživanja dani su u nastavku.



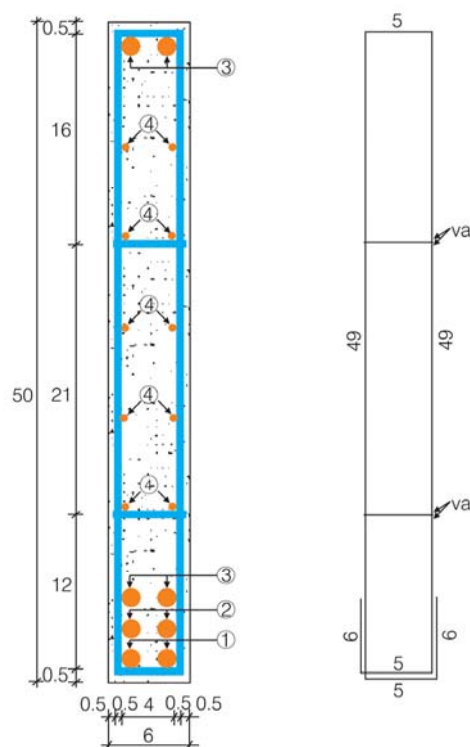
Slika 2. Shema utjecaja oblika spona na raspodjelu bočnih tlakova na beton i deformacije spona pri tlačnom slomu grede

Svrha provedenih istraživanja je dvojaka:

- (i) Stjecanje novih spoznaja o utjecaju spona na nosivost i deformabilnost betonskih greda s tlačnim slomom betona.
- (ii) Provjera razvijenoga numeričkog modela za analizu betonskih štapnih konstrukcija koji uključuje utjecaj spona na tlačnu nosivost betona u gredama (predmet zasebnog rada).

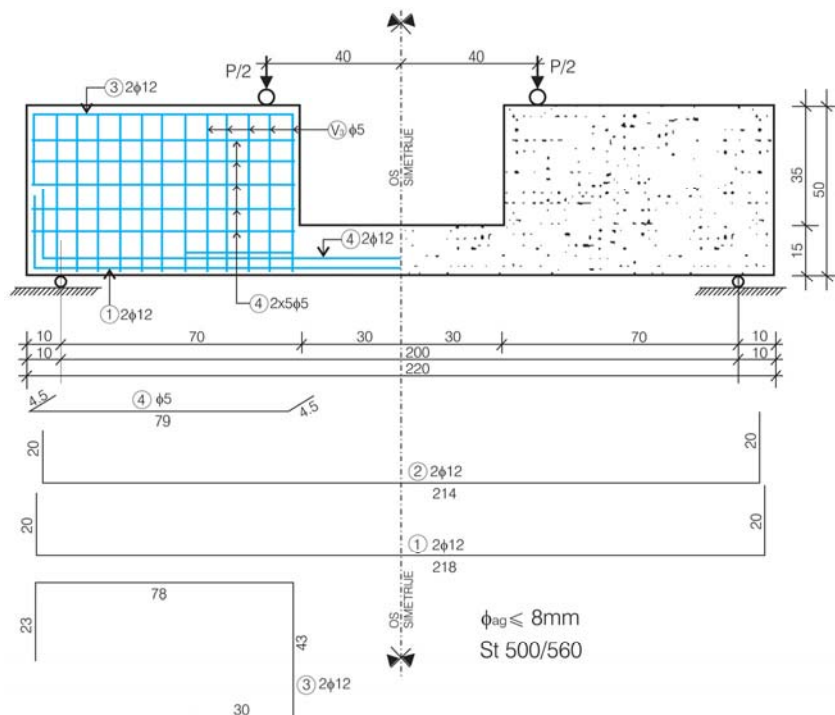
## 2 Osnovni podaci o ispitanim gredama

Ispitane su betonske grede geometrijskog oblika i s armaturom prema slici 3. Duljina greda iznosi 220 cm, a raspon 200 cm. Širina greda je 6 cm, dok im je visina promjenjiva: 15 cm u polju i 50 cm uz ležajeve. Dijelovi grede uz oslonac znatno su veće visine nego u polju i armirani su jakom vertikalnom i horizontalnom armaturom za preuzimanje posmika. Naime, nastojalo se da slom grede ne bude zbog posmika uz oslonce, već zbog savijanja u polju. Donje područje grede armirano je jakim uzdužnom vlačnom armaturom, tako da je slom svih greda uvijek nastao drobljenjem tlačnog betona na srednjem potezu grede visine 15 cm. Greda je opterećena tako da razmatrani srednji dio nema poprečnih sila. Dakle, u tom je dijelu stanje naprezanja samo od savijanja, a slom svih greda nastao je uvijek drobljenjem betona u gornjem tlačnom pojasu. Poprečni presjek grede uz oslonac prikazan je na slici 4., a na srednjem dijelu na slici 5.

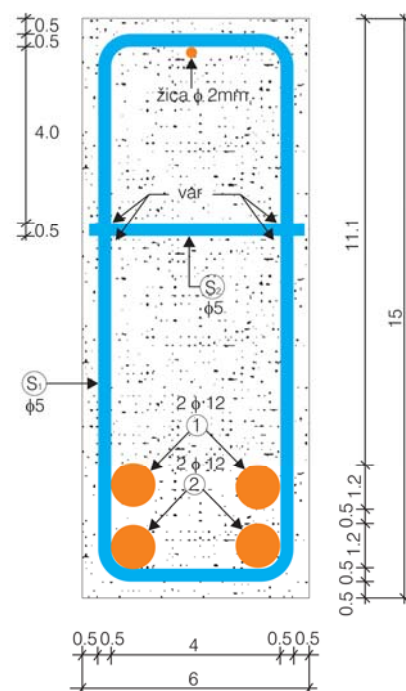


Slika 4. Poprečni presjek grede uz oslonce

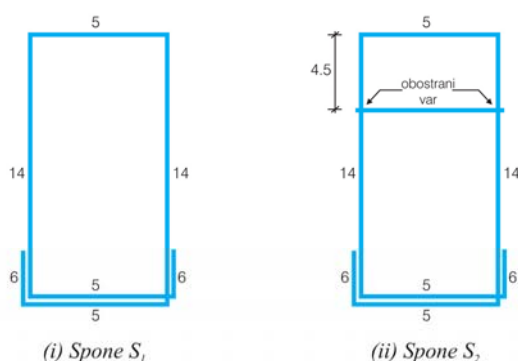
Istražen je utjecaj različitih tipova spona u srednjem dijelu grede na njezinu graničnu nosivost i deformabilnost. Ispitivane su grede bez spona, te sa dva tipa spona prema slici 6.



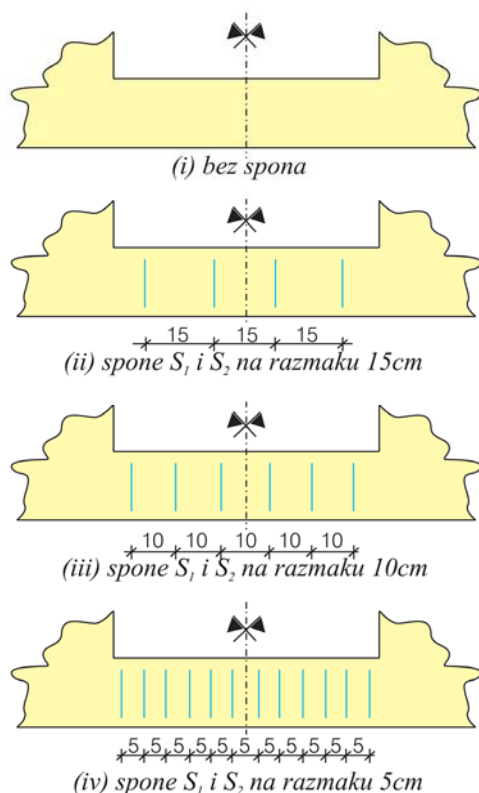
Slika 3. Geometrijski oblik i armatura ispitanih betonskih greda



Slika 5. Poprečni presjek srednjeg dijela grede

Slika 6. Ispitani tipovi spona  $\phi$  St 500/560

Spone  $S_1$  su klasične, dok spone  $S_2$  imaju zavarenu poprečnu žicu  $\phi 5$  mm pri gornjem području presjeka. Očekuje se da će spone  $S_2$  omogućiti veći bočni tlak na beton nego spone  $S_1$ . One bi trebale omogućiti veću uzdužnu tlačnu čvrstoću betona, a time i veću nosivost čitave grede.

Slika 7. Ispitani razmaci spona  $S_1$  i  $S_2$ 

Ispitani razmaci spona  $S_1$  i  $S_2$  prikazani su na slici 7. Dakle, ispitivane su grede bez spona, te grede sa sponama  $S_1$  i  $S_2$  ( $\phi 5$  mm) na razmacima 15 cm, 10 cm i 5 cm. Razmak spona osiguran je njihovim vezanjem za vlačnu armaturu u donjem pojasu i žicu promjera 2 mm u gornjem pojasu (njezin je doprinos tlačnoj nosivosti grede zanemariv). Spone i ostala armatura greda izrađeni su od glatkog čelika St 500/560.

Razmatrane su tri različite kvalitete betona: relativno mala ( $f_c = 24,9$  MPa), relativno srednja ( $f_c = 35,2$  MPa) i relativno velika ( $f_c = 45,1$  MPa). Pri tome  $f_c$  označava jednoosnu tlačnu čvrstoću betonske prizme  $10 \times 10 \times 25$  cm utvrđenu na dan ispitivanja greda. Projektirani betoni su izrađeni od zdravog vapnenca, najvećeg promjera zrna  $\phi_{ag} = 8$  mm, te uobičajenoga portlandskog cementa s odgovarajućim dodacima (superplastifikatori). Vodo-cementi omjer za pojedine mješavine bio je od 0,42 do 0,55, a obujamska masa betona na dan ispitivanja bila je od  $2350 \text{ kg/m}^3$  do  $2420 \text{ kg/m}^3$ .

Razmatrani slučajevi greda (s odgovarajućom kvalitetom betona te oblikom i razmakom spona) sumarno su prikazani u tablici 1. Dakle, istražena su ukupno 21 različita slučaja. Kako su za svaki tip grede izrađena po 3 istovjetna uzorka, ispitane su sveukupno  $3 \times 21 = 63$  grede.

Tablica 1. Razmatrani slučajevi greda

Jednoosna tlačna čvrstoća $f_c$ [MPa]	Razmak spona $e$ [cm]	
	spona $S_1$	spona $S_2$
24,9	bez spona	bez spona
35,2	15	15
45,1	10	10
	7,5	7,5
	5	5

Ako se analizira postotak armiranja ispitanih greda sponama, vidljivo je da je on u širokom rasponu: od 0 % (bez spona) do 8,7 % ( $\phi 5/5$  cm). Pri tome se očekuje da će oblik spona, odnosno način njihova ovijanja tlačnog područja poprečnog presjeka, utjecati na tlačnu čvrstoću betona i graničnu nosivost grede.

Sila  $P$  nanošena je u jednakim prirastima od 5 kN, s tim da su pred slom grede prirasti smanjivani. Mjereni su progibi u sredini raspona i deformacije gornjega tlačnog pojasa betona u sredini grede za svaki prirast sile.

### 3 Prikaz dobivenih rezultata

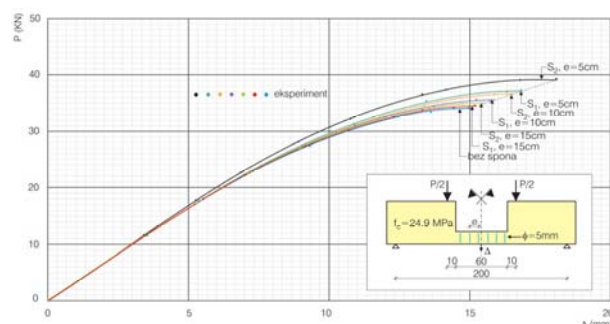
Izmjerene vrijednosti veze sila ( $P$ ) – progib ( $\Delta$ ) u sredini raspona grede prikazane su na slikama 8. do 10., u ovisnosti od  $f_c$ , iz kojih se vidi sljedeće:

- Globalna su obilježja ponašanja greda praktično gotovo neovisna o tlačnoj čvrstoći betona
- Granična nosivost i deformabilnost grede ovise o tipu i razmaku spona. Povećavaju se sa smanjenjem razmaka spona, pri čemu su spone  $S_2$  efikasnije od spona  $S_1$ .
- U odnosu na gredu bez spona, granično povećanje nosivosti grede sa sponama  $S_2$  na razmaku  $e = 5$  cm iznosi oko 15 % i povećanje graničnih progiba oko 20 %.
- Grede od betona većih čvrstoća imaju veću graničnu nosivost i manju duktilnost od greda od betona ma-

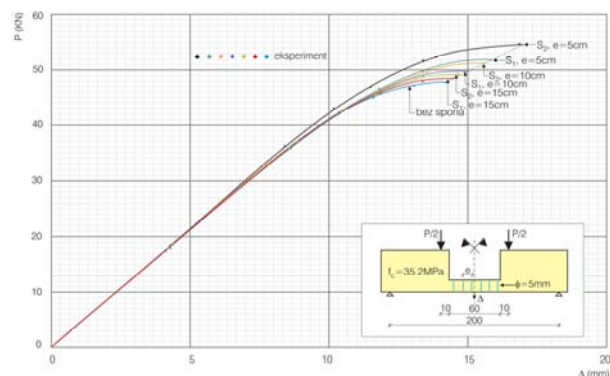


njih čvrstoća. Odnosi nosivosti i deformabilnosti greda bez spona i greda armiranih sponama praktično su jednaki za sve razmatrane čvrstoće betona.

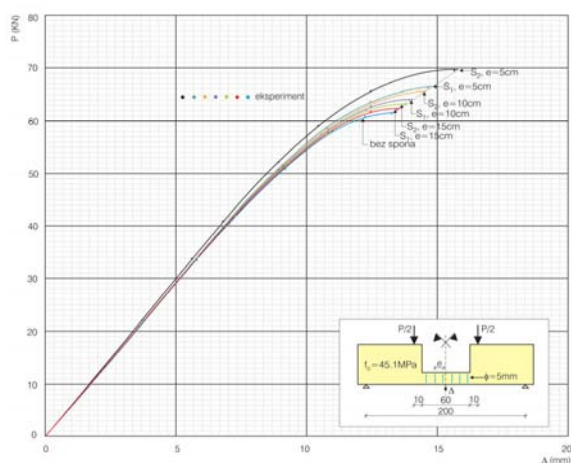
- Ponašanje greda približno je elastično do otprilike  $0,35 f_c$  za  $f_c = 24,9$  MPa, do oko  $0,50 f_c$  za  $f_c = 35,2$  MPa i do oko  $0,60 f_c$  za  $f_c = 45,1$  MPa.
- U odnosu na grede bez spona, grede sa sponama imaju povećano područje elastičnog ponašanja te veću graničnu nosivost i deformabilnost. Spone  $S_2$  su znatno efikasnije od spona  $S_1$ .



Slika 8. Izmjerene vrijednosti veze sile ( $P$ ) – pomak ( $\Delta$ ) kod greda od betona  $f_c = 24,9$  MPa

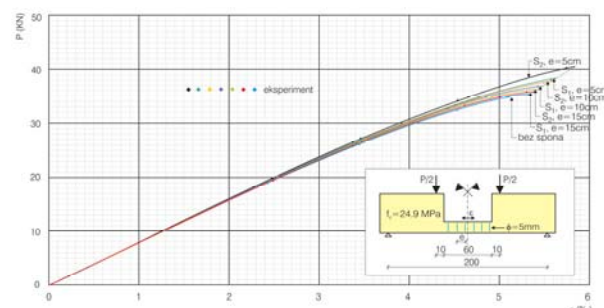


Slika 9. Izmjerene vrijednosti veze sile ( $P$ ) – pomak ( $\Delta$ ) kod greda od betona  $f_c = 35,2$  MPa

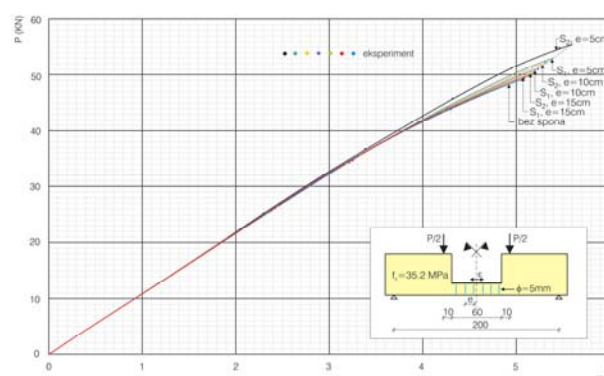


Slika 10. Izmjerene vrijednosti veze sile ( $P$ ) – pomak ( $\Delta$ ) kod greda od betona  $f_c = 45,1$  MPa

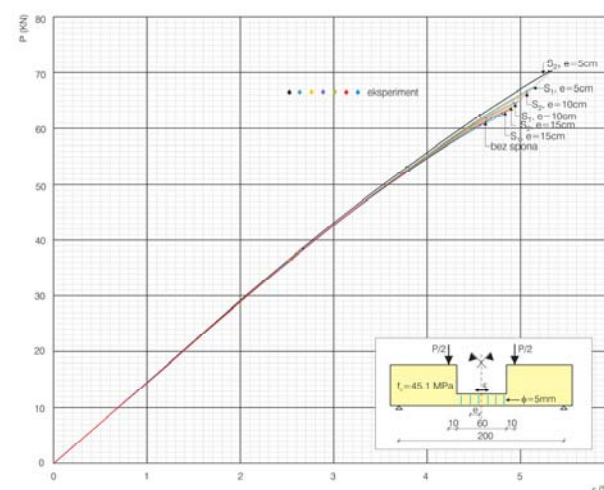
Na slikama 11. do 13. prikazani su dijagrami sile ( $P$ ) – tlačna deformacija gornjeg pojasa grede u sredini raspona ( $\epsilon$ ) u ovisnosti od  $f_c$ . Ti su dijagrami približno afini onima na slikama 8. do 10. i također potvrđuju prethodno navedene zaključke.



Slika 11. Izmjerene vrijednosti veze sile ( $P$ ) – tlačna deformacija betona ( $\epsilon$ ) kod greda od betona  $f_c = 24,9$  MPa



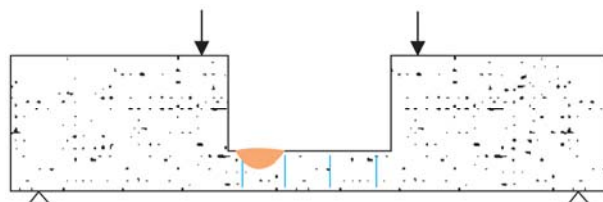
Slika 12. Izmjerene vrijednosti veze sile ( $P$ ) – tlačna deformacija betona ( $\epsilon$ ) kod greda od betona  $f_c = 35,2$  MPa



Slika 13. Izmjerene vrijednosti veze sile ( $P$ ) – tlačna deformacija betona ( $\epsilon$ ) kod greda od betona  $f_c = 45,1$  MPa

Pomaci i deformacije greda pri stvarnom slomu bili su znatno veći, ali ih s raspoloživom opremom nije bilo moguće pratiti u postlomnom području (nakon dostizanja najveće nosivosti).

Slom svih greda nastao je drobljenjem betona u gornjem tlačnom pojasu. Mjesto sloma bilo je uvijek na potezu grede s manjom visinom, na spoju s dijelom grede veće visine ili neposredno uz njega. Tipični oblik sloma grede ovisio je o razmaku spona i shematski je prikazan na slici 14., a fotografije nekih greda nakon sloma na slici 15.



Slika 14. Karakteristični mehanizam sloma grede drobljenjem betona



Slika 15. Fotografije nekih greda nakon sloma

Najmanji usvojeni razmak spona kod analizirane grede iznosio je 5 cm, tj. približno kao i njezina širina. U praksi je razmak spona često znatno manji od širine grede. Očekuje se da bi prednost spona  $S_2$  u odnosu na spona  $S_1$  u takvim slučajevima gustih spona bila još izraženija. U ovom istraživanju razmak spona nije dalje smanjivan zbog otežane ugradnje betona za tako male izmjere grede i male razmake poprečne armature.

#### 4 Zaključak

Granična nosivost i granična deformabilnost savijanih betonskih greda pri tlačnom slomu povećavaju se sa smanjenjem razmaka spona. Znatno utjecaj na povećanje granične sposobnosti nošenja i povećanje duktilnosti grede ima oblik spona. Znatno su efikasnije spona koje ovijaju beton u tlačnom području od klasičnih dvoreznih spona uz obod presjeka. Naime, da bi se postigla veća tlačna čvrstoća betona i veća nosivost grede, vertikale klasičnih dvoreznih spona treba povezati horizontalnom poprečnom šipkom približno u razini neutralne osi ili tlačno područje presjeka treba oviti dodatnom zatvorenim sponom. U odnosu na grede bez spona, ispitane grede s najvećom poprečnom armaturom i zatvorenim sponama u tlačnom području betona imale su veću nosivost približno 15 % i veću duktilnost oko 20 % (uz još uvijek relativno velik razmak spona u odnosu na širinu grede). Odnosi nosivosti i duktilnosti grede sa sponama, prema jednakima bez spona, praktično ne ovise o čvrstoći betona. Grede od betona većih čvrstoća imaju veću tlačnu nosivost i manju duktilnost od greda od betona manjih čvrstoća.

Preporučuje se u praksi rabiti što manji razmak spona za isti postotak armiranja sponama. Dakle, povoljnije su spona manjeg promjera na manjem razmaku od spona većeg promjera na većem razmaku. Ovo je povoljno sa stajališta povećanja tlačne nosivosti betona, smanjenja duljine izvijanja uzdužnih tlačnih šipki i povećanja nosivosti grede na poprečne sile. Kod greda s velikim odnosom visine i širine presjeka kod kojih do sloma dolazi drobljenjem betona, poželjno je tlačni dio presjeka oviti dodatnim sponama radi povećanja njihove nosivosti i duktilnosti. Osobito se skreće pozornost na potrebu zatvorenih spona u tlačnim pojasi prednapetih greda poradi što boljeg iskorištavanja tlačne nosivosti betona.

#### LITERATURA

- [1] Martinez, S.; Nilsen, A. H.; Slate, F.: *Spirally reinforced, high-strength concrete columns*, Journal proceedings, Vol. 81, No. 5, 1994., str. 431.- 442.
- [2] Pessiki, S.; Peroni, A.: *Axial load behavior of large scale spirally reinforced high strength concrete columns*, ACI Structural journal, Vol. 94, No. 3, 1997., str. 304. - 314.
- [3] Bing, L.; Park, R.; Tanaka, H.: *Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high and normal-strength transverse reinforcements*, ACI Structural journal, Vol. 98, No. 3, 2001., str. 395. - 406.
- [4] Němeček, J.; Padevč, P.; Patzák, B.; Bittnar, Z.: *Effect of transversal reinforcement in normal and high strength concrete columns*, Materials and Structures, Vol. 38, No. 7, 2005., str. 665. - 671.
- [5] Park, R.; Priestley, M. N. J.; Gill, W. D.: *Ductility of square-confined concrete columns*, Journal of Structural Division, Vol. 108, No. 4, 1982., str. 929. - 950.
- [6] Yong, Y. K.; Nour, M. G.; Nawy, E. G.: *Behavior of laterally confined high-strength concrete under axial loading*, Journal of Structural Division, Vol. 114, No. 2, 1988., str. 332. - 351.
- [7] Karim, M.; El-Dash: *Effect of aggregate on the performance of confined concrete*, Cement and concrete research, Vol. 36, No. 3, 2006., str. 599. - 605.
- [8] Liu, J.; Foster, S. J.; Attard, M. M.: *Strength of tied high-strength concrete columns loaded in concentric compression*, ACI Structural journal, Vol. 97, No. 1, 2000., str. 149. - 156.

- 
- [9] Sargin, M.; Gosh, S. K.; Handa, V. K.: *Effect of lateral reinforcement upon the strength and deformation properties of concrete*, Magazin of concrete research , Vol. 23, No. 75-76, 1971., str. 99 - 110.
- [10] Razvi, S. R.; Saatcioglu, M.: *Circular high-strength concrete columns under concentric compression*, ACI Structural journal, Vol. 96, No. 5, 1999., str.817. - 826.
- [11] Saatcioglu, M.; Razvi, S. R.: *Strength and ductility of confined concrete*, Journal of Structural engineering, Vol. 124, No. 12, 1998., str.1731. - 1437.
- [12] Chung, H. S.; Yang, K. H.; Lee, Y. H.; Eun, H. C.: *Strength and ductility of laterally confined concrete columns*, Canad J. Civil engineering, Vol. 29, 2002., str. 820. - 830.
- [13] Tan, T. H., Yip, W. K.: *Behavior of axially loaded concrete columns confined by elliptical hoops*, ACI Structural journal, Vol. 96, No. 6, 1999., str. 967. - 971.